

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ХАРЬКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**ПРОГРАММА, МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ И  
КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ПО КУРСУ  
«ЗАЩИТА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ»**

**для студентов специальности 7.090505  
всех форм обучения**

**Утверждено  
редакционно-издательским  
советом университета  
Протокол № 2 от 17. 06 .05.**

**Харьков НТУ „ХПИ” 2005**

Программа, методические указания и контрольные задания по курсу «Защита окружающей среды в теплоэнергетике» для студентов специальности 7.090505 «Котлы и реакторы» всех форм обучения / Сост.: Гончаренко Л.В., Тютюник Л. И. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2005. - 40 с.

Составители: Л.В. Гончаренко  
Л. И. Тютюник

Рецензент В.Я. Горбатенко

Кафедра парогенераторостроения

## ВСТУПЛЕНИЕ

Энергетика является основным движущим фактором развития всех отраслей промышленности, коммунального и сельского хозяйства, служит базой повышения производительности и благосостояния населения. Она имеет наиболее высокие темпы развития и масштабы производства. Именно поэтому темпы научно-технического прогресса и улучшение условий труда в значительной мере определяются состоянием энергетики и во всех странах мира ей уделяется огромное внимание.

На современном этапе развития энергетики очень важной становится проблема ее взаимодействия с окружающей средой. Экологические условия функционирования энергетики связаны с уникальными масштабами материального и теплового взаимодействия с биосферой (атмосферой, гидросферой, литосферой). Это обусловлено тем, что, потребляя огромное количество первичных ресурсов в виде твердого, жидкого и газообразного топлив, энергетика наряду с производством электрической энергии и теплоты выбрасывает в окружающую среду большое количество отходов в виде газообразных и твердых продуктов сгорания. В соответствии с существующими термодинамическими циклами ТЭС в окружающую среду поступает более 60% потенциальной энергии топлива: физическая теплота, теряемая с уходящими газами, теплота подогретой воды. Кроме этого, выработанные на ТЭС и АЭС электроэнергия и теплота в процессах их передачи и потребления также поступают в окружающую среду.

Следует отметить также, что в связи с развитием ядерной энергетики произошло изменение во взаимодействии энергетики с окружающей средой в сторону снижения загрязнения окружающей среды продуктами сгорания и золошлаковыми отходами, но при этом возникли выбросы АЭС, не менее опасные по влиянию на биосферу, чем выбросы ТЭС.

Так как органическое топливо пока является основным источником производства электроэнергии и теплоты, то для предотвращения увеличения выбросов вредных примесей необходимы существенные затраты средств и сил для разработки и внедрения экономически приемлемых способов охраны окружающей среды.

Важной стороной проблемы взаимодействия энергетики и окружающей среды является и все более возрастающее обратное влияние – окружающая среда диктует условия принятия технических решений при проектировании предприятий энергетики: выбор типа и единичных мощностей энергетического оборудования, выбор места строительства ТЭС, ГЭС, АЭС и т.п.

Необходимо отметить, что проблема защиты окружающей среды от вредных выбросов энергетики и других отраслей промышленности по своим масштабам является как национальной, так и глобальной, так как распространение выбросов не имеет границ. Поэтому при ООН, МИРЭК и

других международных организациях созданы специальные органы для изучения, обсуждения, анализа экологических проблем и заключения международных договоров.

Таким образом, на современном этапе развития энергетики проблема ее взаимодействия с окружающей средой является весьма острой, многосторонней и требует особого внимания. Особенно остро стоит эта проблема в энергетике Украины, современное состояние и перспективы, развития которой приведены в [1,2].

## **1. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

Изучение дисциплины «Защита окружающей среды в теплоэнергетике» является важным этапом подготовки специалистов в области парогенераторостроения. Цель изучения – подготовка студентов к использованию полученных знаний и навыков на стадии дипломного проектирования и в последующей профессиональной деятельности. Задача изучения дисциплины – знакомство студентов с проблемами охраны окружающей среды, возникающими в теплоэнергетике, с законодательством Украины и нормативами в области защиты окружающей среды, с основными современными методами и способами снижения вредных выбросов в окружающую среду, приобретение умений и навыков в проведении расчетов концентраций вредных веществ и решении практических задач по их снижению.

Изучение дисциплины невозможно без знания высшей математики, физики, химии, технической термодинамики, тепломассообмена, теории горения топлив, конструкций энергетических и энерготехнологических агрегатов. Базой экологической подготовки при этом являются знания и навыки, полученные студентами в результате изучения на 3 курсе дисциплины «Основы экологии».

В соответствии с действующим учебным планом специальности 7.090505 «Котлы и реакторы» изучение дисциплины осуществляется на пятом курсе. Студентам дневной формы обучения планируется 30 часов лекционных занятий и 15 часов практических занятий. Студентам заочной формы обучения соответственно 20 часов и 6 часов, самостоятельная работа составляет 63 часа и выполняется одна контрольная работа. Итоговый контроль – экзамен.

В связи с тем, что в дисциплине «Вспомогательные системы котлов и реакторов» студенты изучают теоретические основы золоулавливания и выполняют курсовую работу по проектированию газоотводящего тракта котла и выбору золоулавливающих устройств учебная программа настоящей дисциплины предусматривает изучение различных методов, направленных на снижение выбросов двух основных загрязнителей биосферы, генерируемых

при сжигании топлив в котельных агрегатах: оксидов азота и сернистых соединений. При этом основной упор делается на конкретные технологические схемы и устройства.

В программу дисциплины не включены также вопросы, связанные с очисткой сточных вод и выбросов АЭС, так как они рассматриваются в специальных дисциплинах.

Так как студентам заочной формы обучения приходится изучать дисциплину самостоятельно (за исключением установочных занятий), то им следует придерживаться следующих рекомендаций:

- изучение вести систематически и последовательно по темам в соответствии с программой, создавая сжатый конспект, которым удобно пользоваться при повторении материала и подготовке к экзамену;

- при изучении теоретического материала и особенно при решении задач необходимо обращать особое внимание на размерности встречающихся величин, так как они отражают физический смысл происходящих процессов;

- переходить к изучению следующей темы только после полного усвоения материала предыдущей темы, т.е. после того как даны ответы на все вопросы для самопроверки;

- если при изучении дисциплины возникают вопросы, на которые студенты затрудняются ответить самостоятельно, то следует обратиться за письменной или устной консультацией к преподавателю.

Требования, предъявляемые на экзамене – знание теории и физической сущности происходящих процессов, а также умение применять основные теоретические положения к решению практических задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

### Основная:

1. І.В. Плачков та ін. Сучасний стан і перспективи розвитку електроенергетики України// „Енергетика і електрифікація”– 1999 – №5.
2. Энергетика и охрана окружающей среды / Под ред. Н.Г.Залогина, Л.И.Кроппа и Ю.М.Кострыкина. – М.: Энергия, 1979.
3. Рихтер Л.А. и др. Охрана водного и воздушного бассейнов от выбросов тепловых электростанций. – М.: Энергоиздат, 1981.
4. Ф.В. Скалкин и др. Энергетика и окружающая среда – Л.:Энергоиздат, 1981.
5. Первая Американско-Украинская конференция «Защита атмосферного воздуха от вредных выбросов ТЭС». – Киев, 1996.
6. А.Н. Безгрешнов, Ю.М. Липов, Б.М. Шлейфер. Расчет паровых котлов в примерах и задачах: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Под ред. Н.В. Кузнецова и др. – М.: Энергия, 1973.

Дополнительная:

8. Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива. – Л.: Недра, 1977.

9. А.И. Родионов и др. Техника защиты окружающей среды. – М.: Химия, 1989.

## **2. ПРОГРАММА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ТЕМАМ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **2.1. Введение**

Масштабы вредных загрязнений окружающей среды в теплоэнергетике. Современное состояние энергетики Украины, проблем и задач, связанных с защитой окружающей среды. Законодательство и нормативные акты Украины, регламентирующие выбросы оксидов азота и двуокиси серы существующим и вновь проектируемым оборудованием ТЭС. Модель взаимодействия ТЭС и окружающей среды. Задачи специалистов в области охраны окружающей среды.

**Методические указания:**

В процессе изучения этой темы необходимо уяснить, что, несмотря на огромные масштабы выбросов вредных веществ, тепловые электростанции не являются основными загрязнителями окружающей среды. Их вклад составляет не более 30% от суммарных выбросов в окружающую среду субъектами народного хозяйства Украины. Следует учесть также, что нормативы выбросов оксидов азота и сернистых соединений, приведенные в Постановлении Кабмина Украины, носят временный характер.

**Вопросы для самопроверки:**

1. Каковы масштабы потребления органического топлива в мире и в Украине?
2. Как распределяется потребность в топливе по отраслям промышленности в мире и в Украине?
3. Каковы показатели современного состояния охраны окружающей среды и проблемы, возникающие на ТЭС Украины?
4. Какими основными факторами характеризуется взаимодействие ТЭС и окружающей среды?
5. Каковы значения предельно допустимых концентраций (ПДК) оксидов азота и сернистых соединений?
6. Почему при расчете высоты дымовых труб учитывается суммарное воздействие оксидов азота и диоксида серы на окружающую среду?

7. Каковы граничные показатели концентрации оксидов азота и диоксида серы в выбросах существующих и вновь проектируемых котлоагрегатов с учетом их единичной тепловой мощности и вида сжигаемого топлива?

8. Какие задачи по защите окружающей среды ставятся перед специалистами при модернизации существующих и проектировании новых котельных установок?

## **2.2. РАЗДЕЛ 1. Технологические и химические методы снижения выбросов оксидов азота**

### **2.2.1. Образование оксидов азота при сжигании энергетических топлив на ТЭС**

Характеристика оксидов азота ( $NO_x$ ) как вредных выбросов. Оценка их воздействия на природу, животный мир и человека. Источники и механизм образования оксидов азота в топках котлов. Основные факторы, существенно влияющие на генерацию оксидов азота.

#### **Методические указания:**

Оксиды азота являются весьма вредной примесью: даже при минимальных дозах в воздухе они раздражающе воздействуют на органы дыхания, окисляют атмосферные осадки, разрушают оборудование и материалы, способствуют образованию смогов и ухудшению видимости, (фотохимическое загрязнение атмосферы), истощают озоновый слой. Следует обратить внимание, на тот факт, что оксиды азота могут образовываться при сжигании всех видов топлива. Из всех возможных оксидов азота наиболее токсичными являются  $NO$  и  $NO_2$ , причем  $NO_2$  вчетверо токсичнее  $NO$ .

Основными источниками образования оксидов азота являются молекулярный азот дутьевого воздуха и азотсодержащие компоненты топлива. В связи с этим принято делить оксиды азота на воздушные и топливные. Воздушные, в свою очередь, можно разделить на термические и так называемые «быстрые». Термические оксиды азота интенсивно образуются при высоких температурах (свыше 1540 °C). «Быстрые» оксиды генерируются в зоне сравнительно низких температур с образованием промежуточных углеродистых соединений  $CN$  и  $HCN$  и последующим быстрым их окислением до  $NO$ .

Необходимо внимательно разобраться в сложных химических реакциях, протекающих при образовании трех вышеприведенных видов оксидов азота и оценить влияние таких параметров, как коэффициент избытка воздуха в топке, температура в зоне горения топлива и время пребывания газов в котле.

Обратить внимание на многочисленные факторы, определяющие процесс сжигания топлива в топке котла с точки зрения образования оксидов азота.

**Вопросы для самопроверки:**

1. Какие оксиды азота Вы знаете? Охарактеризуйте их с точки зрения токсичности.
2. Как протекают химические реакции образования топливных оксидов азота?
3. Как протекают химические реакции образования термических оксидов азота?
4. Как протекают химические реакции образования «быстрых» оксидов азота?
5. Каковы количественные соотношения между различными видами оксидов азота, образующихся при сжигании топлив?
6. Почему концентрация оксидов азота определяется в пересчете на  $NO_2$ ?
7. Концентрация какого оксида азота при сжигании топлив в котле имеет превалирующее значение по сравнению с другими?
8. Какие факторы учитывает формула, предложенная Я.Б. Зельдовичем для определения концентрации двуокси азота?
9. Как учел сложную зависимость концентрации  $NO_x$  от многих факторов, влияющих на процесс горения, И.Я. Сигал?
10. Каковы ориентировочные значения концентраций оксидов азота, генерируемых в котельных агрегатах различной мощности при сжигании газообразных, твердых и жидких топлив?

**2.2.2. Технологические и режимные (топочные) методы  
снижения концентраций оксидов азота ( $C_{NO_x}$ )**

Современные достижения в области применения топочных методов снижения  $C_{NO_x}$  в котельных агрегатах. Эффективность различных технологических и режимных мероприятий: уменьшение коэффициента избытка воздуха, рециркуляция продуктов сгорания, ступенчатое сжигание топлива, уменьшение единичной мощности горелочных устройств, применение двухсветных экранов, подача воды и пара в зону горения топлива, уменьшение температуры подогрева воздуха, снижение нагрузки котла, применение специальных горелочных устройств с низким выходом  $NO_x$ . Сочетание рассматриваемых топочных методов.



### **Методические указания:**

При изучении этой темы следует усвоить, что для снижения концентраций  $NO_x$  необходимо: снизить температурный уровень в зоне горения топлива, уменьшить в ней концентрацию кислорода, растянуть факел по высоте топки котла и сократить время пребывания газов в зоне высоких температур. Для реализации этого в котельных агрегатах применяются вышеперечисленные в программе данной темы мероприятия.

Уменьшение коэффициента избытка воздуха при сжигании всех видов топлива приводит к снижению выбросов оксидов азота на 15-20%. Для организации процесса горения с низкими коэффициентами избытка воздуха необходимо исключить присосы воздуха в топку, что можно осуществить за счет применения газоплотных экранов.

Рециркуляция продуктов сгорания топлива в топку с температурой 300-400 °С в количестве 15-20 % позволяет на 40-50% уменьшить концентрацию  $NO_x$ .

Стадийное (двух-, трехстадийное) сжигание топлива – наиболее радикальный способ снижения  $C_{NO_x}$ . При этом в первичную зону горения (нижнюю часть топки) подается количество воздуха меньше теоретически необходимого, вследствие чего происходит неполное сгорание топлива с частичной его газификацией при пониженной температуре факела. Во вторичную (или третичную) зону подается остальной воздух или обедненная топливовоздушная смесь для обеспечения полноты сгорания топлива. Такая технология сжигания топлива дает возможность в 2-2,5 раза уменьшить выбросы  $NO_x$ .

Установка большого количества горелок меньшей мощности в несколько ярусов и применение двухсветных экранов позволяет рассредоточить зону горения по высоте топки и, тем самым, снизить  $C_{NO_x}$ .

Впрыск воды и пара в зону горения в количестве 5-10% от расхода дутьевого воздуха дает возможность снизить на 10-12% выбросы  $NO_x$ , но приводит к увеличению объема продуктов сгорания и, соответственно, к росту потерь теплоты с уходящими газами.

Уменьшение температуры подогрева воздуха ограничено из-за опасности ухудшения процесса горения топлива.

Снижение нагрузки котла оправдано лишь в случае наличия неблагоприятных метеорологических условий, так как приводит к уменьшению его к.п.д.

Применение специальных горелочных устройств с низким выходом  $NO_x$  в связи с заменой турбулентного смесеобразования прямоточным и

организацией ступенчатого сжигания топлива в них дает возможность снизить  $C_{NO_x}$  на 25-40%.

Следует отметить, что одновременное применение рециркуляции продуктов сгорания со стадийным сжиганием топлива при низких значениях коэффициента избытка воздуха позволяет существенно повысить эффективность технологических методов снижения  $C_{NO_x}$ .

### **Вопросы для самопроверки:**

1. Почему топочные методы получили широкое распространение при проектировании новых и модернизации существующих котлов?

2. Какая опасность возникает при уменьшении коэффициента избытка воздуха ниже предельного значения?

3. Как изменяется  $C_{NO_x}$  при изменении коэффициента избытка воздуха? Почему?

4. Каков характер изменения  $C_{NO_x}$  с увеличением температуры факела в восстановительной ( $\alpha < 1$ ) и окислительной ( $\alpha > 1$ ) зонах горения?

5. Как изменяется температура факела по высоте топки при рециркуляции продуктов сгорания топлива? Сравните с аналогичным изменением при отсутствии рециркуляции.

6. Как изменяется  $C_{NO_x}$  по высоте топки при рециркуляции продуктов сгорания топлива и без нее?

7. Как изменяется температура факела по высоте топки при организации двухступенчатого сжигания топлива? Сравните с аналогичным изменением при одноступенчатом сжигании.

8. В какой части топки имеет место восстановительная зона горения?

9. Как изменяется  $C_{NO_x}$  по высоте топки при организации двухступенчатого сжигания топлива по сравнению с одноступенчатым?

10. Почему увеличение количества горелок пониженной удельной мощности способствует снижению выбросов оксидов азота?

11. Почему снижение температуры нагрева воздуха является малоэффективным способом снижения образования  $NO_x$ ?

12. Какова эффективность впрыска влаги и пара в зону горения топлива как способа снижения  $C_{NO_x}$ ?

13. Какие принципиальные отличия горелок с низким выходом  $NO_x$  по сравнению с обычно применяемыми?

14. Какова ориентировочная эффективность отдельных и совместно применяемых топочных мероприятий по снижению генерации оксидов азота в котлах ТЭС?

### **2.3. Очистка продуктов сгорания топлива от оксидов азота**

Химические методы очистки продуктов сгорания. Современные достижения и перспективы. Абсорбция. Адсорбция. Суть каталитических процессов газоочистки. Катализаторы и предъявляемые к ним требования. Наиболее распространенные методы, применяемые в теплоэнергетике.

#### **Методические указания:**

В связи с постоянным повышением требований к экологической чистоте энергетических производств не всегда удастся обеспечить их рассмотренными в п.2.2.2 методами. Поэтому в мировой практике все больше внимания уделяется химическим методам очистки отходящих газов от вредных примесей. В основу таких методов положены химические реакции восстановления или конверсии вредных примесей в безвредные продукты, как с применением катализаторов, так и без них. Следует помнить, что очистка продуктов сгорания от оксидов азота стала экономически оправданной и доступной лишь в последние годы. Это обусловлено тем, что в процессе очистки необходимо обработать большие объемы газов с низкой концентрацией этого химически устойчивого и малорастворимого в воде соединения. Кроме этого, сдерживающими факторами являются: дороговизна катализаторов и необходимость частой их замены в связи с отравлением  $SO_2$  и  $SO_3$ , обеспечение селективности процесса восстановления, присутствие в продуктах сгорания реакционноспособных веществ, таких как  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $O_2$ . Это требует больших капитальных и эксплуатационных затрат и соответствующего повышения себестоимости вырабатываемых электроэнергии и теплоты. Несмотря на это, в последнее время на ТЭС многих стран мира внедряются различные достаточно апробированные методы очистки продуктов сгорания от  $NO_x$ . Наиболее широкое применение получили следующие методы: селективное некаталитическое восстановление (СНКВ), селективное каталитическое восстановление (СКВ), неселективное каталитическое восстановление (НСКВ), разложение  $NO_x$  гетерогенными восстановителями. Кроме этих технологий перспективными являются такие

методы, как, например, озонно-аммиачный, электронно-лучевой, каталитический с применением в качестве катализатора  $CuO/CuSO_4$  и т.д.

### **Вопросы для самопроверки:**

1. Какие трудности возникают при применении химических методов очистки продуктов сгорания топлива от  $NO_x$ ?
2. На какой стадии в мире находятся разработка и внедрение химических методов очистки продуктов сгорания топлива от  $NO_x$ ?
3. Что положено в основу химических методов очистки продуктов сгорания топлива от  $NO_x$ ?
4. Что представляют собой абсорбционные методы очистки продуктов сгорания топлива? Какова их эффективность?
5. Что представляют собой адсорбционные методы очистки продуктов сгорания топлива? Какие адсорбенты применяются?
6. Какова роль катализаторов в процессе очистки?
7. От каких факторов зависит активность катализатора?
8. Какие требования предъявляются к катализаторам?
9. Каковы перспективы применения в теплоэнергетике химических методов очистки продуктов сгорания топлива от  $NO_x$ ?

### **2.3.1. Метод селективного некаталитического восстановления $NO_x$ (СНКВ)**

Сущность метода СНКВ. Основные химические реакции. Принципиальная технологическая схема процесса восстановления  $NO_x$ . Оценка эффективности метода. Современное состояние, примеры и перспективы использования метода СНКВ на ТЭС.

### **Методические указания:**

Метод СНКВ основан на восстановлении  $NO_x$  до  $N_2$  и  $H_2O$  в присутствии кислорода и восстановителя – аммиака (или мочевины) в зоне высоких температур ( $950\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ ).

Основные достоинства метода: возможность снизить концентрацию  $NO_x$  на 40-60 % и совмещать с процессом сероочистки.

Недостатки: узкий температурный интервал процесса восстановления, проскок аммиака в окружающую среду, загрязнение

воздухоподогревателя бисульфатом аммония, более высокая стоимость по сравнению с организационно-технологическими методами.

Кроме аммиака и мочевины в качестве восстановителя могут использоваться циануровая кислота, сульфат аммония, карбонат аммония и др., которые вводятся с помощью пара, воздуха, газов рециркуляции.

СНКВ успешно применено в современных мощных котлах, сжигающих природный газ, мазут, уголь и бытовые отходы.

### **Вопросы для самопроверки:**

1. Какими химическими реакциями сопровождается процесс восстановления  $NO_x$ ?
2. Почему процесс СНКВ чувствителен к температурному уровню продуктов сгорания в котельном агрегате?
3. Какие мероприятия позволяют расширить температурный интервал СНКВ ( $950\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$ )?
4. Совместим ли процесс СНКВ с топочными методами снижения концентрации  $NO_x$ ?
5. От каких факторов зависит степень восстановления  $NO_x$ ?
6. В каких случаях следует применять СНКВ?
7. Какой способ ввода восстановителя в котельный агрегат является более предпочтительным?

## **2.3.2. Метод селективного каталитического восстановления $NO_x$ (СКВ)**

Сущность метода СКВ. Химические реакции процесса восстановления  $NO_x$ . Факторы, оказывающие существенное влияние на СКВ. Принципиальная технологическая схема процесса СКВ. Оценка эффективности метода. Современное состояние, примеры и перспективы внедрения СКВ на ТЭС.

### **Методические указания:**

СКВ осуществляется аммиаком на поверхности катализатора в присутствии кислорода при температурах  $200 - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В качестве катализаторов применяются оксиды титана, железа, хрома, меди и пятиоксида ванадия, которые практически не отравляются оксидами серы.

Достоинства СКВ: высокая степень очистки (до 95 %), безвредные продукты реакций восстановления (азот и вода), расход восстановителя

эквивалентен содержанию  $NO_x$  за счет селективности процесса, низкий температурный уровень.

Недостатки: загрязнение воздухоподогревателя бисульфатом аммония, выбросы в атмосферу аммиака, чувствительность к температурному режиму, имеются проблемы с точки зрения охраны окружающей среды при замене и дезактивации катализаторов, высокая стоимость катализаторов (20 – 30 % от затрат на очистку).

Следует отметить, что, несмотря на указанные недостатки и, в особенности, дороговизну метода, в последнее время СКВ очень широко применяется в зарубежной энергетике благодаря его очень высокой эффективности по степени восстановления  $NO_x$ , что очень важно в связи с возросшими нормативными требованиями по защите окружающей среды.

#### **Вопросы для самопроверки:**

1. Какие химические реакции протекают в процессе восстановления  $NO_x$ ?
2. Какая реакция является основной и почему?
3. Какими факторами определяется эффективность метода СКВ?
4. Почему процесс СКВ чувствителен к температурному уровню продуктов сгорания в котельном агрегате?
5. Какие катализаторы применяются в процессе СКВ и почему?
6. Какое влияние оказывает селективность процесса на расход восстановителя?
7. Какова стоимость метода СКВ? От каких факторов она зависит?
8. Как изменяется температура продуктов сгорания топлива на выходе из котельного агрегата при применении СКВ?

### **2.3.3. Методы неселективного каталитического восстановления $NO_x$ (НСКВ) и разложения $NO_x$ гетерогенными восстановителями**

Сущность метода НСКВ. Химические процессы, протекающие при использовании различных восстановителей  $NO_x$ . Принципиальная технологическая схема процесса. Оценка эффективности метода. Достижения, примеры и перспективы внедрения НСКВ на ТЭС. Сущность метода разложения  $NO_x$  гетерогенными восстановителями. Оценка эффективности метода.

#### **Методические указания:**

Применение НСКВ вызвано попыткой заменить экологически опасный аммиак другими восстановителями, такими как метан, природный, коксовый или нефтяной газы, оксид углерода, водород или азотноводородная смесь. Эти восстановители действуют неселективно, т.к. взаимодействуют с  $O_2$  и  $SO_x$ , что требует большого их количества. В качестве катализаторов применяются металлы платиновой группы (палладий, платина, родий) или более дешевые, но и менее эффективные и стабильные в эксплуатации (никель, хром, медь, цинк, ванадий, церий и др.).

Достоинства метода: высокая степень восстановления, относительно безвредные восстановители. Недостатки: большой расход восстановителя, необходимость очистки восстановленных газов от  $CO$  и  $O_2$ , возможность очистки газов только с низкой концентрацией  $NO_x$  (до 0,5%), дороговизна катализаторов.

Метод разложения  $NO_x$  гетерогенными восстановителями представляет собой процесс восстановления  $NO_x$  при высоких температурах (500-1300 °C), осуществляемый на твердых углеродсодержащих материалах: угле, коксе, графите, которые одновременно выполняют функции катализатора и топлива. При 800 °C степень восстановления  $NO_x$  на коксе может достичь 96 %, а при 1000 °C – близка к 100 %. Однако быстрая потеря активности таких катализаторов приводит к неполному восстановлению оксидов азота.

### **Вопросы для самопроверки:**

1. Почему необходимо осуществлять замену аммиака другими восстановителями?
2. Какими химическими реакциями сопровождаются процессы восстановления  $NO_x$  в  $N_2$  при использовании в качестве восстановителей метана,  $CO$ , водорода?
3. Почему требуется большой расход восстановителя?
4. Какие катализаторы применяются в процессе НСКВ? Почему?
5. Каков температурный уровень, в диапазоне которого необходимо осуществлять НСКВ?
6. Какие факторы оказывают существенное влияние на эффективность НСКВ?
7. Как изменяется температура уходящих из котла газов при использовании метода НСКВ?
8. Какими химическими реакциями сопровождается процесс восстановления  $NO_2$  гетерогенными восстановителями?

9. Каков температурный уровень процесса восстановления  $NO_x$  гетерогенными восстановителями?

10. Почему активность катализатора, представляющего собой гетерогенный восстановитель, быстро падает?

### **3. Раздел 2. Снижение выбросов окислов серы в атмосферу**

#### **3.1. Проблемы и задачи, возникающие при защите окружающей среды от выбросов сернистых соединений. Методы сероочистки топлив до их использования в котлах**

Масштабы выбросов  $SO_2$  энергетическими предприятиями. Характеристика оксидов серы как вредных выбросов. Источники образования  $SO_2$  в топках котлов. Классификация методов сероочистки. Современные достижения и перспективы в области сероочистки. Извлечение серы из жидкого и твердого топлив до их сжигания. Газификация топлив как способ снижения концентраций  $SO_2$  в дымовых газах. Связывание сернистых соединений при сжигании топлива в кипящем слое.

#### **Методические указания:**

Во всем мире возрастают требования к защите окружающей среды в связи с прогнозом экономистов об ускоренном взрывном технико-экономическом развитии. Одним из объектов повышенного внимания при этом являются сернистые соединения, которые образуются при сжигании органических топлив. Ущерб, причиняемый выбросами оксидов серы, настолько велик, что во многих странах осуществляются рассчитанные на несколько лет вперед программы сероочистки. Исследования и разработки последних лет в области сероочистки показали, что в настоящее время существует большое количество процессов, способных удовлетворить разным техническим и экономическим требованиям.

При изучении темы следует усвоить, что решение проблемы снижения выбросов соединений серы при сжигании органического топлива может быть осуществлено с помощью следующих мероприятий:

- 1) использование на ТЭС топлив с малым содержанием серы;
- 2) извлечение серы из топлив до их сжигания путем обогащения на специализированных предприятиях;
- 3) связывание серы в процессе сжигания топлива;
- 4) сероочистка дымовых газов.



Первое мероприятие – так называемый метод непостоянно действующей технологии – предусматривает, что при благоприятных метеорологических условиях на электростанции сжигается высокосернистое топливо, при неблагоприятных – малосернистое.

Второе мероприятие в зависимости от вида топлива может быть реализовано на различных специализированных предприятиях. Обессеривание мазута может быть осуществлено на нефтеперерабатывающих заводах прямым или косвенным способом. При прямом способе нефтяной остаток подвергается каталитической гидрообработке при повышенных температуре и давлении. Косвенный способ серочистки заключается в том, что путем вакуумной перегонки мазута отделяются летучие вещества от тяжелых нефтяных остатков. Затем эти легкие компоненты обессериваются путем гидроочистки и смешиваются с тяжелыми. При этом получается котельное топливо с содержанием серы менее 1 % по массе.

Технология по обессериванию твердых топлив заключается в отделении серного колчедана (пирита) от угля на углеобогащительных фабриках. Плотность колчедана в 2,5 раза выше плотности угля, колчедан обладает магнитными свойствами. Эти свойства и используются в процессах сухого и мокрого обогащения угля. Обогащение может быть эффективно (20-30 %), если доля колчеданной серы в угле достаточно высока, как, например, в подмосковном буром угле. Для обессеривания твердых топлив могут применяться и другие более дорогие способы. Например, гидротермическая сероочистка измельченного топлива в автоклавах при температуре 225-350 °C и давлении 1,8 МПа с применением щелочных растворов гидратов оксидов натрия и кальция. Для удаления органической серы применяются различные специальные растворители в присутствии водорода при температурах порядка 450 °C и давлении 1,4 МПа.

Третье мероприятие осуществляется путем газификации жидких и твердых топлив и сжигания этих топлив в кипящем слое. При этом как в первом, так и во втором случае связываются сернистые соединения различными реагентами с последующим получением товарной продукции в виде элементарной серы или диоксида серы, применяемых в сернокислотном и других производствах.

Процесс газификации твердого или жидкого топлив осуществляется в специальных газогенераторах при неполном их окислении ( $\alpha=0,4-0,5$ ), высокой температуре (900–1300°C) и давлении от 1,5 до 10 МПа. В зависимости от применяемого дутья (воздух, кислород, водяной пар) теплота сгорания генераторного газа может колебаться в больших пределах: от 4,5 до 16,5 МДж/м<sup>3</sup>. В процессе газификации 70-72 % теплоты сгорания топлива переходит в теплоту сгорания газа, а остальная часть составляет физическую теплоту продуктов газификации и потери теплоты в окружающую среду. Выбросы сернистых соединений в окружающую среду в результате использования этой технологии можно уменьшить на 92 – 95 % путем

улавливания  $H_2S$  и  $SO_2$  с последующим превращением их в товарную серу или серную кислоту.

Применение кипящего слоя для сжигания сернистых топлив позволяет примерно на 90 % химически связывать серу с помощью дробленого известняка (или других сорбентов) при температуре 750 – 850 °С. При этой температуре происходит термическая диссоциация известняка с образованием оксида кальция, который вступает во взаимодействие с сернистыми соединениями, образуя сульфат и сульфид кальция. Для уменьшения расхода известняка и извлечения сернистого ангидрида осуществляется регенерация серноокислого кальция при температуре 1000 – 1100 °С. Регенерированный оксид кальция снова подается в кипящий слой. Следует отметить, что в связи с низким температурным уровнем процесса горения топлива существенно уменьшается возможность образования оксидов азота.

Четвертое мероприятие – сероочистка дымовых газов – является наиболее сложным и дорогостоящим. Это обусловлено тем, что концентрация  $SO_2$  в дымовых газах относительно мала, растворимость в воде низкая. Поэтому требуются большое количество дорогостоящих реагентов и катализаторы для связывания диоксида серы, а также многочисленное аппаратное обеспечение схем сероочистки.

#### **Вопросы для самопроверки:**

1. Какое количество  $SO_2$  ежегодно выбрасывается ТЭС в окружающую среду?
2. Какой ущерб окружающей среде и экономике наносится выбросами сернистых соединений?
3. Каковы нормативы удельных выбросов в атмосферу диоксида серы, установленные в Украине и России?
4. Какие организационно-технические мероприятия необходимо осуществлять для снижения выбросов сернистых соединений?
5. Как осуществляется обессеривание топлива на углеобогащательных фабриках?
6. Какие технологические процессы по обессериванию мазута осуществляются на нефтеперерабатывающих заводах?
7. Как изменяется цена топлива после его сероочистки?
8. Почему газификация твердых и жидких топлив является эффективным способом снижения выбросов  $SO_2$  в окружающую среду?
9. Каковы достоинства и недостатки газификации топлив с точки зрения защиты окружающей среды от вредных выбросов?
10. Как осуществляется связывание и удаление сернистых соединений в процессе сжигания топлива в кипящем слое?

11. Каковы достоинства и недостатки сжигания топлива в кипящем слое как способа снижения концентрации диоксида серы в продуктах сгорания топлива?

### **3.2. Сероочистка дымовых газов**

Современное состояние и достижения в области сероочистки продуктов сгорания топлива. Классификация наиболее эффективных методов. Абсорбционные и адсорбционные способы связывания сернистых соединений.

#### **Методические указания:**

В настоящее время в мире эксплуатируется более 750 установок сероочистки дымовых газов. Примерно в 70 % этих установок используется промывка продуктов сгорания известковой или известняковой суспензией. Около 20 % оборудованы сухими и мокросухими системами с распыливанием натрийсодержащих или известковых суспензий. Оставшиеся 10 % установок используют другие различные технологии.

В процессе изучения этой темы следует учитывать, что химические методы очистки отходящих из котельных агрегатов газов от вредных примесей являются достаточно сложными и высокочрезвычайно дорогостоящими системами. Поэтому их внедрение в энергетику необходимо осуществлять лишь в тех случаях, когда полностью исчерпаны другие, более простые и, соответственно, более дешевые методы. В то же время необходимо знать, что основными достоинствами сероочистки дымовых газов являются их безусловно высокая эффективность (90 - 95 %) и возможность применения практически вне зависимости от вида сжигаемого топлива. Следует также иметь в виду, что в основу химических методов очистки положена химическая реакция и ее роль является преобладающей над процессами абсорбции, адсорбции, конденсации или сжигания.

В настоящее время разработано более 60 способов сероочистки, основными из которых являются: мокрые, мокро-сухие, сухие, каталитические и другие, как, например, озонно-аммиачный, электронно-лучевой и т.п.

#### **Вопросы для самопроверки:**

1. Почему в последнее время уделяется большое внимание использованию химических методов сероочистки продуктов сгорания топлива?

2. В чем заключается суть химических и каталитических методов очистки газов?

3. Каковы достоинства и недостатки химических методов сероочистки?
4. Что представляют собой процессы абсорбции, адсорбции, хемосорбции?
5. Каковы достижения и перспективы в области использования технологий сероочистки дымовых газов на ТЭС?

### **3.2.1. Мокрые методы сероочистки**

Известковый и известняковый, аммиачно-циклический, магнезитовый, содовый двуциклический методы сероочистки. Эффективность, достоинства и недостатки этих методов.

#### **Методические указания:**

В энергетике наиболее перспективными из мокрых способов сероочистки являются: известняковый, магнезитовый, аммиачно-циклический, содово-циклический. К основным их достоинствам следует отнести: высокую степень очистки, возможность получать товарную продукцию в виде серной кислоты, серы, удобрений, строительных материалов. Однако они не лишены недостатков: большие капитальные и эксплуатационные затраты, имеются проблемы в обеспечении эксплуатационной надежности, возникает необходимость в дополнительных площадях на территории ТЭС и в подогреве очищенных газов перед эвакуацией их в окружающую среду.

Наиболее полно разработанным и доведенным до практического применения процессом является известняковый способ сероочистки. Он основан на связывании диоксида серы в абсорбере дешевыми щелочными реагентами: гидратом окиси или карбонатом кальция. Простота технологии, высокая степень очистки (85 – 95 %), недорогие реагенты и материалы для изготовления аппаратов, отсутствие повышенных давлений и вакуума, высокая надежность в эксплуатации определили его приоритетное применение в энергетике.

#### **Вопросы для самопроверки:**

1. Каковы особенности, достоинства и недостатки известнякового способа сероочистки?
2. Каковы особенности, достоинства и недостатки магнезитового способа сероочистки?
3. Каковы особенности, достоинства и недостатки аммиачно-циклического способа сероочистки?
4. Каковы особенности, достоинства и недостатки содово-циклического способа сероочистки?

5. Почему в настоящее время наиболее широко в энергетике внедряется известняковый способ сероочистки?

6. Какие факторы и побочные эффекты сдерживают внедрение на ТЭС магнезитового, аммиачно-циклического и содово-циклического способов сероочистки?

### **3.2.2. Мокро-сухие и сухие методы сероочистки**

Достижения и перспективы внедрения на ТЭС мокро-сухих и сухих методов сероочистки. Мокро-сухие технологии. Сухие (адсорбционные) технологии. Эффективность, достоинства и недостатки мокро-сухих и сухих технологий.

#### **Методические указания:**

При изучении данной темы необходимо усвоить, что сухие и мокро-сухие способы сероочистки являются менее затратными по сравнению с мокрыми, но при этом и эффективность очистки ниже. Применение сухих способов позволяет снизить концентрацию диоксида серы на 25 – 30 %, мокро-сухих – на 40 -60 %. Основу этих способов составляет связывание сернистых соединений в процессе сжигания топлива путем подачи в топку или газоходы котла молотых, гранулированных или дробленых реагентов: извести, известняка, доломита, солей натрия и т.п.

#### **Вопросы для самопроверки:**

1. В каких случаях следует применять на ТЭС мокро-сухие и сухие методы сероочистки продуктов сгорания топлива?

2. Каковы особенности, достоинства и недостатки мокро-сухих методов сероочистки?

3. Каковы особенности, достоинства и недостатки сухих методов сероочистки?

4. Почему эффективность мокро-сухих технологий сероочистки выше сухих технологий?

### **3.2.3. Каталитические методы сероочистки дымовых газов**

Каталитические процессы газоочистки. Катализаторы, применяемые в газоочистных технологиях. Факторы, оказывающие существенное влияние на активность катализаторов. Процесс сероочистки путем окисления  $SO_2$  в  $SO_3$ . Эффективность, достоинства и недостатки процесса.

### **Методические указания:**

Суть каталитических процессов газоочистки заключается в конверсии подлежащих обезвреживанию примесей в другие продукты в присутствии специальных катализаторов. Катализаторы не вызывают изменения энергетического уровня молекул взаимодействующих веществ и смещения равновесия химических реакций. Их роль сводится к увеличению скоростей реакций. При этом масса и свойства катализаторов теоретически не должны претерпевать никаких изменений, что на практике, однако, не соблюдается, т.к. катализаторы подвергаются постоянной дезактивации за счет химических факторов (отравление каталитическими ядами, присутствующими в газах, недостаточная селективность катализатора, и т.п.) и физических факторов (механический износ, спекание, агрегатирование). В связи с этим к катализаторам предъявляются требования в отношении их высокой активности, селективности по отношению к конвертируемым примесям, стойкости к механическим и термическим нагрузкам, стоимости, низких температур зажигания. Этим требованиям отвечают катализаторы, созданные на основе благородных металлов (платина, палладий, родий, серебро и др.), оксидов марганца, меди, кобальта, ванадия, а также оксидных материалов, активизированных благородными металлами в количестве 1–1,5 %. Как правило, катализаторы подбираются опытным путем.

Технологический процесс окисления  $SO_2$  в  $SO_3$  протекает в специальном реакторе на ванадиевом катализаторе при высокой температуре за счет кислорода, содержащегося в продуктах сгорания. После охлаждения газов и промывки их холодной серной кислотой осуществляется улавливание в волокнистом фильтре  $H_2SO_4$  85 % крепости. Эффективность сероочистки достигает 90 %.

### **Вопросы для самопроверки:**

1. Что представляет собой активность катализатора, как ее определить?
2. От каких факторов существенно зависит активность катализатора?
3. Какие требования предъявляются к катализаторам?
4. Каковы особенности, достоинства и недостатки процесса сероочистки путем окисления  $SO_2$  в  $SO_3$  ?

### 3.2.4. Методы, позволяющие одновременно снижать выбросы оксидов азота и диоксидов серы

Каталитический процесс сероочистки с применением  $CuO/CuSO_4$ . Процесс дополнительного ввода в дымовые газы  $NO_2$ . Электронно-лучевой метод. Озонно-аммиачный метод. Эффективность, достоинства и недостатки этих методов.

Технико-экономическое сравнение различных технологий сероочистки дымовых газов.

#### Методические указания:

Материалы этой темы свидетельствуют о том, что существует ряд технологических процессов, дающих возможность снижать концентрацию как  $NO_x$ , так и  $SO_2$  в продуктах сгорания топлива. В качестве примера рассмотрены следующие процессы сероочистки: с использованием в качестве катализатора  $CuO/CuSO_4$  и с дополнительным вводом в дымовые газы  $NO_2$ . Эффективность таких технологий достаточно высока, они позволяют обеспечить 90-95 % очистку дымовых газов от  $SO_2$  и 75-80 % очистку от  $NO_x$ . При этом они дают возможность получать товарную продукцию в виде 80 % серной кислоты и 50 % азотной кислоты.

Следует обратить внимание на перспективную электронно-лучевую технологию очистки дымовых газов ТЭС от  $NO_x$ ,  $SO_2$  и золы, разработанную НИПИ «Энергосталь» (г. Харьков) с целью внедрения на Славянской ГРЭС [6], позволяющую на 85-95 % снизить выбросы оксидов азота и оксидов серы и получить товарную продукцию в виде аммонийных удобрений.

Интересной технологией одновременной очистки дымовых газов от  $SO_2$  и  $NO_x$  является озонно-аммиачный метод, разработанный НИИ Теплоэнергетики (г. Горловка) совместно с ИХФ РАН. Процесс предусматривает окисление оксида азота в газовой фазе озоном до диоксида, после чего дымовой газ орошается раствором известняка либо аммиака в реакторе. Метод позволяет обеспечить степень очистки от  $SO_2$  90 % и от  $NO_x$  75 %.

Приведенное в [6] технико-экономическое сравнение различных технологий сероочистки дымовых газов, позволяет сделать вывод о том, что по эффективности связывания  $SO_2$  предпочтение следует отдать мокрой известняковой технологии, однако эта технология имеет и самые высокие

удельные капитальные затраты. Стоимость удаления  $SO_2$  из дымовых газов оказывается наиболее высокой в случае использования мокро-сухой технологии (при сжигании топлива с содержанием серы от 0,5 % до 2 %).

### **Вопросы для самопроверки:**

1. В чем заключается преимущество методов, позволяющих одновременно снижать концентрацию  $NO_x$  и  $SO_2$  в продуктах сгорания топлива, по сравнению с другими методами?
2. Каковы особенности, достоинства и недостатки процесса сероочистки с применением в качестве катализатора  $CuO/CuSO_4$  ?
3. Каковы особенности, достоинства и недостатки процесса сероочистки, осуществляемого путем ввода  $NO_2$  в продукты сгорания топлива?
4. Каковы особенности, достоинства и недостатки электронно-лучевого метода сероочистки?
5. Каковы особенности, достоинства и недостатки озонно-аммиачного метода сероочистки?
6. Каковы эффективность, удельные капитальные и эксплуатационные затраты различных химических методов сероочистки продуктов сгорания топлива?

## **4. Контрольная работа**

Контрольная работа состоит из теоретической и практической частей. Номер варианта контрольной работы определяется преподавателем.

### **4.1. Теоретическая часть**

Студенты должны дать письменные ответы на 4 вопроса, номера которых приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Номера вопросов к контрольной работе

<b>Вариант</b>	<b>№ вопросов</b>	<b>Вариант</b>	<b>№ вопросов</b>
01	1,2,3,4	11	1, 11, 21, 31
02	5,6,7,8	12	2, 12, 22, 32
03	9,10,11,12	13	3, 13, 23, 33
04	13,14,15,16	14	4, 14, 24, 34
05	17,18,19,20	15	5, 15, 25, 35
06	21,22,23,24	16	6, 16, 26, 36



Продолжение табл. 4.1

07	25,26,27,28	17	7, 17, 27, 37
08	29,30,31,32	18	8, 18, 28, 38
09	33,34,35,36	19	9, 19, 29, 39
10	37,38,39,40	20	10, 20, 30, 40

### **Перечень вопросов:**

1. Приведите модель взаимодействия ТЭС с окружающей средой и пояснения к ней.
2. Охарактеризуйте оксиды серы как вредные выбросы в окружающую среду.
3. Масштабы выбросов оксидов серы в окружающую среду энергетическими предприятиями.
4. Способы очистки твердых топлив от сернистых соединений до их сжигания.
5. Удаление серного колчедана из твердого топлива на углеобогащательных предприятиях.
6. Уменьшение концентрации сернистых соединений в мазуте на нефтеперерабатывающих заводах.
7. Газификация твердых топлив как способ снижения концентрации сернистых соединений в продуктах сгорания.
8. Газификация сернистого мазута.
9. Снижение концентрации сернистых соединений путем сжигания топлива в кипящем слое.
10. Сероочистка продуктов сгорания топлива, краткая характеристика наиболее перспективных способов.
11. Известковый (известняковый) способ сероочистки продуктов сгорания топлива
12. Магnezитовый способ сероочистки продуктов сгорания топлива.
13. Аммиачно-циклический способ сероочистки продуктов сгорания топлива.
14. Содово-циклический способ сероочистки продуктов сгорания топлива.
15. Краткая характеристика сухих и мокро-сухих способов сероочистки продуктов сгорания топлива.
16. Ввод известняка в топку котла с целью снижения выбросов диоксида серы.
17. Сероочистка продуктов сгорания топлива путем каталитического окисления  $SO_2$  в  $SO_3$ .
18. Каталитический процесс сероочистки продуктов сгорания топлива с использованием в качестве катализатора  $CuO/CuSO_4$ .

19. Достоинства и недостатки известкового(известнякового) способа сероочистки продуктов сгорания топлива.
20. Сравнение технико-экономических показателей различных способов сероочистки продуктов сгорания топлива.
21. Характеристика оксидов азота как вредных выбросов в энергетике. Основные источники их образования.
22. Механизм образования термических, топливных и “быстрых” оксидов азота.
23. Основные факторы, оказывающие существенное влияние на образование оксидов азота в топках котлов.
24. Краткая характеристика и технико-экономическая оценка технологических (топочных) мероприятий по снижению выбросов оксидов азота.
25. Влияние коэффициента избытка воздуха в топке на концентрацию оксидов азота.
26. Рециркуляция продуктов сгорания топлива как способ снижения выбросов оксидов азота.
27. Снижение концентрации оксидов азота в продуктах сгорания топлива путем организации ступенчатого сжигания топлива.
28. Уменьшение концентрации оксидов азота в продуктах сгорания топлива путем впрыска конденсата и пара в топку.
29. Уменьшение выбросов оксидов азота путем снижения температуры подогрева воздуха в воздухоподогревателях.
30. Применение ступенчатого сжигания топлива в сочетании с рециркуляцией продуктов сгорания для снижения выбросов оксидов азота.
31. Применение горелочных устройств с пониженной генерацией оксидов азота.
32. Краткая характеристика и технико-экономическая оценка химических способов снижения концентрации оксидов азота в продуктах сгорания топлива, покидающих котельный агрегат.
33. Селективное некаталитическое восстановление оксидов азота (СНКВ).
34. Селективное каталитическое восстановление оксидов азота (СКВ).
35. Неселективное каталитическое восстановление оксидов азота (НСКВ).
36. Снижение концентрации оксидов азота в продуктах сгорания топлива гетерогенными восстановителями.
37. Оценка эффективности применения наиболее распространенных технологических методов снижения концентраций оксидов азота в котлах.
38. Химические методы снижения концентрации оксидов азота в продуктах сгорания топлива: бескаталитические и каталитические.

39. Количественные соотношения между термическими, топливными и “быстрыми” оксидами азота при сжигании различных видов топлива. Формула Зельдовича Я. Б.

40. Методы и пути снижения выбросов оксидов азота в энергетике.

#### **4.1.1. Методические указания к теоретической части контрольной работы**

При оформлении контрольной работы необходимо полностью приводить формулировки вопросов. Ответы на поставленные вопросы должны быть исчерпывающими и сопровождаться необходимыми рисунками и схемами с обозначением всех элементов, пояснительным текстом и химическими формулами протекающих реакций.

#### **4.2. Практическая часть (задача)**

Выполнить расчет концентрации оксидов азота  $C_{NO_2}$ , образующихся при сжигании различных видов топлива в энергетических котлах, и осуществить оценку эффективности применения технологических и режимных мероприятий по снижению выбросов оксидов азота в окружающую среду. Для решения задачи в такой постановке необходимо:

1. Выполнить расчет концентраций  $C_{NO_2}$  при номинальной нагрузке котла  $D_{ном.}$ , отсутствии рециркуляции продуктов сгорания в топку ( $\gamma = 0$ ) и отсутствии ступенчатого сжигания топлива ( $\overline{B}_1 = 1,0$ ;  $\beta_n = 0$ ). Оценить, как изменится концентрация  $NO_2$  при частичных нагрузках, равных:  $D = 0,6D_{ном.}$ ,  $D = 0,8D_{ном.}$  и представить графическую зависимость  $C_{NO_2} = f(D)$ .

2. Оценить влияние степени рециркуляции продуктов сгорания топлива на  $C_{NO_2}$ , приняв  $\gamma = 0,1$  и  $\gamma = 0,15$  при  $D_{ном.}$  и отсутствии ступенчатого сжигания топлива ( $\overline{B}_1 = 1,0$ ;  $\beta_n = 0$ ). Построить график зависимости  $C_{NO_2} = f(\gamma)$ .

3. Оценить влияние двухступенчатого сжигания топлива в котле на  $C_{NO_2}$  при  $D_{ном.}$ ,  $\gamma = 0$ , приняв в качестве исходных данных  $\overline{B}_1$  из таблицы 4.2 и  $\beta_n = 0,21$ .

4. Оценить совместное влияние рециркуляции продуктов сгорания топлива и двухступенчатого сжигания на  $C_{NO_2}$  топлива при  $D_{ном.}$ , приняв

$r=0$ ;  $r=0,1$ ;  $r=0,15$ ,  $\overline{B_1}$  из таблицы 4.2 и  $\beta_n = 0,21$ . Построить график зависимости  $C_{NO_2} = f(r, \text{ступ. сж.})$ .

Исходные данные к задаче следует принять в соответствии с вариантом из таблицы 4.2, предложенным преподавателем.

#### 4.2.1. Методические указания к практической части контрольной работы

##### Методические указания:

К выполнению практической части следует приниматься только после изучения материала подраздела 2.2. При этом рекомендуется ознакомиться с решениями аналогичных задач, приведенных в [7].

В топках паровых котлов при горении топлива образуются оксиды азота двух типов – оксид  $NO$  и диоксид  $NO_2$ , причем на выходе из дымовых труб оксид  $NO$  составляет до 95% суммы оксидов  $NO_x = NO + NO_2$ . Доокисление  $NO$  до  $NO_2$  происходит в процессе распространения продуктов сгорания топлива в атмосфере. Поэтому расчеты концентраций оксидов азота осуществляются по  $NO_2$ .

В топках котельных агрегатов при сжигании всех видов топлива образуются оксиды азота трех видов; топливные, термические и «быстрые».

Топливные – образуются при температуре газовой среды 800-2200 °С за счет окисления азота, входящего в состав топлива ( $N^P$ ).

Термические – образуются при высоких температурах факела (более 1540 °С) за счет окисления молекулярного азота, входящего в состав дутьевого воздуха.

«Быстрые» – образуются при контакте углеводородных соединений топлива с азотом поступающего в горелки воздуха в начальной зоне факела при относительно невысоких температурах (500 – 700 °С).

##### 4.2.1.1. Расчет суммарной концентрации оксидов азота\*

Так как механизм образования топливных, термических и «быстрых» оксидов азота различен, то в процессе решения задачи необходимо определить концентрацию каждого из них и затем просуммировать.

---

\* С целью упрощения математической записи в формулах символ  $C_{NO_2}$  заменен на  $NO_2$ .

Таблица 4.2 – Исходные данные

Вариант	Тип марка котельного агрегата	Месторож. марка топлива	$q_v$ , $МВт/м^3$	$q_F$ , $МВт/м^3$	$a_T$ , $М$	$\theta_T$ , $М$	$t_{2,в.}$ , $^{\circ}C$	$\alpha_T$	$\Delta\alpha_T$	$T''_{2, K}$	$\psi_{2,в.}$	$\alpha_{PH}$	$\overline{B}_l$	Место установки, тип и к-во горелок
01	Е-500-13,8-560 ГМН (ТГМЕ-464)	Серпнистый мазут	0,228	3,55	7,68	13,5	272	1,03	0	1453	0,45	1,15	0,85	Задняя ст.. вихр. 8 шт.
02	Е-420-13,8-560 ГМН (БКЗ-420-140 НГМ-4)	Дашава-Киев, природ. газ	0,213	1,93	5,93	13,2	235	1,05	0,02	1483	0,44	1,17	0,87	Фронт. ст. вихр. 8 шт.
03	Е-420-13,8-560 КТ (БКЗ-420-140-5)	Экибастузский СС	0,155	3,37	15,4	8,98	418	1,2	0,05	1463	0,45	1,16	0,9	Боковая ст. вихр. 8 шт.
04	Пп-1000-25-545 ГМ (ТГМП-314А)	Малосернистый мазут	0,194	5,12	17,3	8,77	325	1,03	0,05	1453	0,44	1,14	0,89	Встречн. вихр. 8 шт.
05	Е-320-13,8-560 КТ/ДТ (БКЗ-320-140-6)	Фрезерный торф	0,112	2,59	12,1	7,7	390	1,2	0,05	1223	0,42	1,15	0,86	Одно- фронт. вихр. 4 шт.
06	Пп-1000-25-545 К (ТПП-312А)	Донецкий Г/Р	0,155	4,86	17,2	8,72	384	1,15	0,05	1463	0,45	1,17	0,89	Встречн. вихр. 8 шт.
07	Е-320-13,8-560 ГМ (БКЗ-320-140 ГМ-8)	Сред. Азия Центр пр. газ	0,248	4,19	11,8	5,45	246	1,05	0,02	1478	0,43	1,14	0,85	Фронт. вихр. 6 шт.
08	Е-420-13,8-560 БТ (БКЗ-420-140-7)	Назаровское, БЗ	0,12	2,87	7,7	14,5	375	1,25	0,05	1373	0,42	1,16	0,87	Фронт. ст. н. 6 шт.
09	Е- 220-9,8-540 КБТ (БКЗ-220-100-9)	Донецкий Д/Р	0,15	3,26	9,34	6,73	381	1,2	0,05	1453	0,45	1,15	0,91	Встр. бок. ст. вихр. 6 шт.
10	Е-160-9,8-540 ГМ (БКЗ-160-100 ГМ-4)	Бухара-Урал природ. газ	0,314	3,78	4,49	7,1	228	1,05	0,02	1483	0,44	1,17	0,88	Боковая ст. вихр. 4 шт.

Продолжение табл. 4.2

Ва ри ант	Тип марка котельного агрегата	Месторож. марка топлива	$q_v$ , $MВт/м^3$	$q_F$ , $MВт/м^3$	$a_T$ , $м$	$\theta_T$ , $м$	$t_{z,6.},$ $0C$	$\alpha_T$	$\Delta\alpha_T$	$T_2''$ , $K$	$\psi_{3.2.}$	$\alpha_{пл}$	$\overline{B_1}$	Место установки, тип и к-во горелок
11	Е-140-8-500ГМ	Шебел.- Харьк. природ.газ	0,158	3,21	5,5	7,0	342	1,1	0,05	1403	0,43	1,13	0,87	Боковая ст. Вихр 4 шт.
12	Е-140-8-500КТ	Донецкий АЩ	0,158	3,21	5,5	7,0	387	1,2	0,05	1438	0,42	1,14	0,9	Боковая ст. Вихр 4 шт.
13	Е-220-9,8-570ГМ (ТГМЕ-159)	Мазут М200	0,196	2,8	6,2	9,1	250	1,03	0,05	1433	0,44	1,17	0,84	12 шт. вихр. задн. 2 яруса
14	Пп-1650-25-545/542КТ (П-57Р)	Экибаст.	0,134	5,3	9,84	21,8	355	1,2	0,02	1464	0,42	1,16	0,87	24 шт. вихр. бок. 2 яруса
15	Е-420-13,8-560БЖ (БКЗ-420-140ПТ-2)	Ирша- Бородин.Б2	0,133	3,36	6,58	14,5	348	1,2	0,05	1385	0,43	1,16	0,88	8 шт. щелевая прямоточ.
16	Е-500-13,8-560КДТ (ТПЕ-430)	Донецкий Д/О	0,107	2,79	16,1	8,64	410	1,2	0,02	1420	0,45	1,17	0,85	8 шт. плоск. фр. задн. ст.
17	Еп-670-13,8-545КДТ (ТПЕ-214А)	Кузнецкий Г/Р	0,072	3,38	12,5	13,5	385	1,05	0,02	1415	0,43	1,16	0,88	8 шт. 2 яр. прамот. фр. задн. ст.
18	Еп-670-13,8-545ГМН (ТГМЕ-206)	Сред. Азия Центр пр. газ	0,255	3,74	18,0	7,68	232	1,03	0,02	1480	0,44	1,15	0,86	12 шт. вихр. задн. 2 яруса
19	Пп-3950-25- 545/542ГМН (ТГМП-1202)	Высокосер- нистый мазут	0,239	8,8	10,26	30,9	270	1,03	0,02	1450	0,45	1,16	0,89	56 шт. вихр. фр. задн. ст.
20	Е-210-13,8-560КБТ (БКЗ-210-140-9)	Пенорский марки Д	0,139	2,94	9,34	6,73	255	1,2	0,05	1450	0,44	1,14	0,85	Боковая ст. Вихр 6 шт.

При сжигании твердого и жидкого топлива концентрация оксидов азота определяется по формуле

$$NO_2 = NO_2^{mp} + NO_2^{ml} + NO_2^{\delta}, \text{ мг/м}^3, \quad (4.1)$$

где  $NO_2^{mp}$  – концентрация термических оксидов азота, мг/м<sup>3</sup>;

$NO_2^{ml}$  – концентрация топливных оксидов азота, мг/м<sup>3</sup>;

$NO_2^{\delta}$  – концентрация «быстрых» оксидов азота, мг/м<sup>3</sup>.

При сжигании природного газа в связи с отсутствием в нем топливного азота суммарная концентрация оксидов азота составляет

$$NO_2 = NO_2^{mp} + NO_2^{\delta}, \quad \text{мг/м}^3. \quad (4.2)$$

В случае, если необходимо определить суммарную концентрацию оксидов азота, мг/м<sup>3</sup>, при отличной от номинальной нагрузке котельного агрегата, расчет концентраций окислов азота осуществляется по следующей формуле

$$NO_2 = \left[ \frac{D}{D_{ном}} \right] NO_2^{mp} + \left[ \frac{D}{D_{ном}} \right]^{0.5} (NO_2^{ml} + NO_2^{\delta}), \quad (4.3)$$

где  $D$  – частичная нагрузка котельного агрегата, выражаемая в долях от  $D_{ном}$ .

#### 4.2.1.2. Расчет концентрации термических оксидов азота

При расчете концентрации термических оксидов азота  $NO_2^{mp}$  определяющими параметрами являются: максимальная температура факела; температурный интервал реакции окисления азота, входящего в состав дутьевого воздуха, и время пребывания продуктов сгорания в топочной камере. Максимальная температура факела зависит от условной адиабатической температуры в зоне горения,  $K$ , которая определяется следующим образом:

$$T'_a = \frac{Q'_m}{V_z^0 C'_z + 1,016(\alpha_{зоп} - 1) \cdot V_g^0 C'_g} + 273, \quad (4.4)$$

где  $Q'_m$  – тепловыделение в зоне горения, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>), которое определяется по формуле:

$$Q'_m = Q_n^p + Q_{zg} + Q_{ml}, \quad (4.5)$$

где  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>), определяется для заданного вида топлива по данным [8];

$Q_{т.л.}$  – физическая теплота топлива кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>), при решении задачи можно ею пренебречь ввиду незначительности;

$Q_{зв}$  – теплота, вносимая горячим воздухом в топку, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>), которая определяется по формуле;

$$Q_{зв} = (\alpha_m - \Delta\alpha_m - \Delta\alpha_{пл}) \cdot I_{зв}^0 + (\Delta\alpha_m + \Delta\alpha_{пл}) \cdot I_{хв}^0 \quad (4.6)$$

где  $\alpha_m$  – коэффициент избытка воздуха в топке (задан, табл.4.2);

$\Delta\alpha_m$  – присос воздуха в топку (задан, табл.4.2);

$\Delta\alpha_{пл}$  – присосы воздуха в пылесистеме, при сжигании твердых топлив принять  $\Delta\alpha_{пл}=0,1$ , при сжигании природного газа и мазута принять  $\Delta\alpha_{пл}=0$ ;

$I_{зв}^0$  – энтальпия горячего воздуха, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>);

$I_{хв}^0$  – энтальпия холодного воздуха, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>).

С целью упрощения расчета и в связи с небольшим количеством теплоты, вносимой присосанным холодным воздухом, вторым слагаемым уравнения (4.6) можно пренебречь.

$V_z^0$  – теоретический объем продуктов сгорания топлива при  $\alpha=1$ , м<sup>3</sup>/кг; (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>), определяется по данным [8];

$V_в^0$  – теоретический объем воздуха, необходимого для полного сгорания топлива при  $\alpha=1$ , м<sup>3</sup>/кг; (м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>); определяется по данным [8];

$\alpha_{зоп}$  – коэффициент избытка воздуха в зоне горения, который определяется по формуле

$$\alpha_{зоп} = \alpha_m - 0,5\Delta\alpha_m, \quad (4.7)$$

для газоплотных котлов  $\alpha_{зоп} = \alpha_m$ .

Энтальпия горячего воздуха, кДж/кг; (кДж/м<sup>3</sup>):

$$I_{зв}^0 = V_в^0 \cdot C'_в \cdot t_{зв}. \quad (4.8)$$

Средние теплоемкости продуктов сгорания топлива и воздуха могут быть определены по данным табл. III [8] при предварительном задании значений адиабатической температуры горения  $t_a$ , °С и  $t_{зв}$ , °С или с помощью следующих зависимостей:

теплоемкость продуктов сгорания при сжигании твердого топлива, кДж/м<sup>3</sup> К:

$$C'_z = (1,59 + 0,004W^n) + 0,14K_t, \quad (4.9a)$$



теплоемкость продуктов сгорания при сжигании мазута, кДж/м<sup>3</sup> К :

$$C'_e = 1,58 + 0,122K_t, \quad (4.9б)$$

теплоемкость продуктов сгорания при сжигании природного газа, кДж/м<sup>3</sup> К :

$$C'_e = 1,57 + 0,134K_t, \quad (4.9в)$$

теплоемкость воздуха, кДж/м<sup>3</sup> К :

$$C'_e = 1,46 + 0,092K_t. \quad (4.9г)$$

Здесь  $W^n$  – приведенная влажность топлива (% кг/кДж), которая определяется по формуле:

$$W^n = \frac{W^p}{Q_n^p}, \quad (4.10)$$

где  $W^p$  – влажность твердого топлива, % , определяется по данным [8];

$K_t$  – коэффициент, учитывающий зависимость теплоемкости от температуры:

$$K_t = \frac{t_a - 1200}{1000}, \quad (4.11)$$

где  $t_a$  – ожидаемая адиабатическая температура горения, °С, которая может быть определена по следующим зависимостям:

при сжигании твердого топлива:

$$t_a = \frac{1800}{\alpha_{гор}} \cdot (1 + Q'_m \cdot 10^{-5}), \quad (4.12а)$$

при сжигании мазута и природного газа:

$$t_a = \frac{1950}{\alpha_{гор}} \cdot (1 + 0,36 \cdot Q'_m \cdot 10^{-5}). \quad (4.12б)$$

В первом приближении вместо  $Q'_m$  следует подставлять в формулы (4.12а) и (4.12б) низшую теплоту сгорания топлива  $Q_n^p$ .

После определения значения условной адиабатической температуры горения по формуле (4.4) необходимо сравнить его с полученным по формулам (4.12а) или (4.12б) значением  $T_a = t_a + 273$ . Если расхождение превышает 50 К (50 °С), то следует задаться новым значением  $T_a$  и уточнить величины теплоемкостей продуктов сгорания топлива и воздуха.

Максимальная температура факела в зоне горения топлива с учетом отвода теплоты к экранам, степени выгорания топлива и влияния рециркуляции продуктов сгорания определяется по формуле

$$T_{\text{м}} = \beta_{\text{сз}} \cdot T_{\text{а}}' \cdot (1 - \psi_{\text{зз}})^{0,25} \cdot (1 - r^{1+n\tau}) \cdot m_{\text{з}}, \text{ К}, \quad (4.13)$$

где  $\beta_{\text{сз}}$  – доля сгоревшего топлива в зоне горения:

для твердых топлив  $\beta_{\text{сз}} = 0,95-0,97$  (большее значение для высокореакционного топлива ( $V_{\text{з}} > 28\%$ )),

для природного газа и мазута  $\beta_{\text{сз}} = 0,97-0,99$ ;

$\psi_{\text{зз}}$  – коэффициент тепловой эффективности экранов в зоне ядра факела (задан, табл.4.2);

$r$  – коэффициент рециркуляции продуктов сгорания в зону горения (выбирается в зависимости от условия задачи);

$n$  – коэффициент, учитывающий способ ввода газов рециркуляции в топку:

$n = 6,5$  – при вводе газов через сопла под горелками,

$n = 5,0$  – при вводе газов через кольцевой канал вокруг горелки,

$n = 3,0$  – при смешении газов с горячим воздухом до горелки, либо при вводе между центральным и периферийным каналами горелки.

Так как наиболее эффективным является ввод газов через кольцевой канал вокруг горелки, то в расчете следует принять  $n = 5,0$ .

$m_{\text{з}}$  – коэффициент, учитывающий тип горелки:

$m_{\text{з}} = 1$  – для вихревых настенных горелок;

$m_{\text{з}} = 0,95 \cdot (25/W_{\text{г}})^{0,2}$  – для прямоточных настенных горелок,

где  $W_{\text{г}}$  – скорость движения воздуха на выходе из горелки, м/с (обычно  $W_{\text{г}} = 35 - 40$  м/с);

$m_{\text{з}} = 0,985$  – для подовых горелок с прямоточно–вихревой подачей воздуха.

Теоретическое время достижения равновесной концентрации оксидов азота NO при максимальной температуре факела  $T_{\text{м}}$  определяется по формуле

$$\tau_0 = 0.024 \exp(54290/T_{\text{м}} - 23), \text{ с}. \quad (4.14)$$

Расчетное время реакции образования оксидов азота в топке:

$$\tau_P = \frac{\Delta T_p}{T_a' - T_z''} \cdot \left( \frac{q_f \cdot \Pi}{300} \right)^{0,5} \cdot \tau_{\text{преб}}, \text{ с}, \quad (4.15)$$

где  $\Delta T_p$  – температурный интервал реакции образования оксидов азота, который определяется по формуле

$$\Delta T_p = \frac{T_m^2 \cdot 10^{-5}}{0.614 + T_m \cdot 10^{-5}}, \text{ К}; \quad (4.16)$$

$q_f$  – тепловое напряжение сечения топочной камеры, МВт/м<sup>2</sup>, задано в табл.4.2;

$\Pi$  – расчетный периметр топочной камеры, м, который находится следующим образом:

$$\Pi = 2a_T + 2b_T; \quad (4.17)$$

$T_z''$  – абсолютная температура газов на выходе из топки, К, которая берется из теплового расчета котла (задана, табл.4.2).

Следует учесть, что при рециркуляции продуктов сгорания топлива в топку котла температура  $T_z''$  уменьшается ориентировочно пропорционально коэффициенту рециркуляции  $r$ : увеличение  $r$  на 0,01 приводит к снижению  $T_z''$  на (6÷8) К.

Так как в таблице 4.2  $T_z''$  дано при  $r = 0$ , то при  $r > 0$ ,

$$T_z'' = T_z'' - r \cdot 10^2(6 \div 8);$$

$\tau_{\text{преб}}$  – время пребывания продуктов сгорания в топочной камере, с, которое определяется по формуле

$$\tau_{\text{преб}} = \frac{273 \cdot \xi}{q_v \cdot \overline{T_z} \cdot g_z^n \cdot \alpha_m \cdot (1 + r)}, \quad (4.19)$$

где  $q_v$  – тепловое напряжение топочного объема, МВт/м<sup>3</sup>. В нашем случае величина  $q_v$  задана (см. табл.4.2);

$\overline{T_z}$  – средняя температура газов в топочной камере, К, которая рассчитывается по формуле:

$$\overline{T_z} = 0,84 \left[ (T_m)^4 + (T_z'')^4 \right]^{0,25}; \quad (4.20)$$

$g_z^n$  – удельный приведенный объем газов при  $\alpha = 1$ , м<sup>3</sup>/МДж, который принимается:

– для антрацита и полуантрацита равным  $g_z^n = 0,273$  м<sup>3</sup>/МДж,

– для других видов твердого топлива  $\mathcal{G}_c^n = 0,278 + 0,001W^n$ ,  
м<sup>3</sup>/МДж,

– для мазута  $\mathcal{G}_c^n = 0,281$  м<sup>3</sup>/МДж,

– для природного газа  $\mathcal{G}_c^n = 0,3$  м<sup>3</sup>/МДж;

$\xi$  – коэффициент заполнения сечения топки восходящим потоком газа, который принимается равным:

– при встречном расположении вихревых горелок  $\xi = 0,8$ ,

– при однофронтальном расположении горелок  $\xi = 0,75$ ,

– при тангенциальном расположении горелок  $\xi = 0,7$ ,

– для подовых горелок  $\xi = 0,9$ .

Концентрация термических оксидов азота, мг/м<sup>3</sup>, определяется по следующей зависимости

$$NO_2^{mp} = 7,03 \cdot 10^6 C_{O_2}^{0,5} \cdot \exp(-10860/T_m) \frac{\tau_p}{\tau_0}, \quad (4.21)$$

где  $C_{O_2}$  – концентрация остаточного (избыточного) кислорода в зоне реакции, кг/м<sup>3</sup>, которая определяется по формуле

$$C_{O_2} = \frac{0,21 \cdot V_g^0 \cdot [(\alpha_{zop} - 1) + r \cdot (\alpha_{pu} - \alpha_{zop})] \cdot \rho_{O_2}}{[V_z^0 + (\alpha_{zop} - 1) \cdot V_g^0] \cdot (1 + r)}, \quad (4.22)$$

где  $\alpha_{pu}$  – коэффициент избытка воздуха в газах рециркуляции (табл.4.2);

$\rho_{O_2}$  – плотность кислорода при нормальных физических условиях,

$\rho_{O_2} = 1,428$  кг/м<sup>3</sup>.

В тех случаях, когда разность  $(\alpha_{zop} - 1)$  окажется меньше 0,02, необходимо принимать ее равной 0,02.

#### 4.2.1.3. Расчет концентрации топливных и «быстрых» оксидов азота

Предлагаемая методика расчета позволяет при сжигании твердого топлива и мазута определить суммарную концентрацию вышеуказанных оксидов азота, при этом интенсивность образования их существенно зависит от температурного уровня в топочной камере.

При температурах газов, находящихся в диапазоне:  $1850 \text{ K} \leq T_m < 2200 \text{ K}$ , расчетная формула для концентрации оксидов азота, мг/м<sup>3</sup>, имеет вид:

$$NO_2^{ml+\delta} = 10^3 \cdot (0,4 - 0,1 \cdot N^P) \cdot N^P \cdot \left( \frac{\alpha_{\text{зоп}} + r}{1 + r} \right)^2 \cdot \left( \frac{2200 - T_{\text{м}}}{125} \right)^{0,33}, \quad (4.23)$$

при  $800 \text{ K} < T_{\text{м}} < 1850 \text{ K}$

$$NO_2^{ml+\delta} = 1,25 \cdot 10^3 \cdot (0,4 - 0,1 N^P) \cdot N^P \cdot \left( \frac{\alpha_{\text{зоп}} + r}{1 + r} \right)^2 \cdot \left( \frac{T_{\text{м}} - 800}{1000} \right)^{0,33}, \quad (4.24)$$

Здесь  $N^P$  – содержание азота в топливе, %.

#### 4.2.1.4. Особенности расчета концентраций оксидов азота при сжигании природного газа

Сжигание природного газа характеризуется более быстрым протеканием реакций горения. В результате этого сокращается зона активного горения топлива и поэтому (при других равных условиях) концентрация оксидов азота при сжигании газообразного топлива несколько выше, чем при сжигании твердого топлива и мазута (приблизительно на 30%).

При расчете концентрации термических оксидов азота, образующихся при сжигании природного газа, в формулу (4.23) необходимо вместо  $T_{\text{м}}$  подставить  $T'_{\text{м}} = 1,01 T_{\text{м}}$  с целью учета повышенной скорости горения топлива.

При сжигании природного газа ввиду отсутствия топливного азота могут образовываться только «быстрые» оксиды азота в связи с наличием углеводородных соединений. Концентрация «быстрых» оксидов азота,  $\text{мг/м}^3$ , определяется при этом по формуле

$$NO_2^{\delta} = 10^2 \left[ \frac{\alpha_{\text{зоп}} + r}{1 + r} \right]^2 \left[ \frac{T'_{\text{м}} - 800}{1000} \right]^{0,33}, \quad (4.25)$$

#### 4.2.1.5. Особенности расчета концентраций оксидов азота при ступенчатом сжигании топлива

При двухступенчатом (нестехиометрическом) сжигании топлива в связи с уменьшением коэффициента избытка воздуха ниже его стехиометрического значения температура факела в первой (нижней) зоне горения снижается. Подача обедненной топливно-воздушной смеси во вторую (верхнюю) зону горения с целью исключения неполноты сгорания

топлива практически не оказывает влияния на температурный уровень в топке котла и генерация оксидов азота становится существенно меньшей по сравнению с одноступенчатым сжиганием топлива. Поэтому для определения концентрации  $NO_x$  расчет температуры факела  $T_m$  выполняется по формуле (4.13) при замене в ней доли сгоревшего топлива  $\beta_{ce}$  на  $\beta'_{ce}$ , которая рассчитывается по следующей зависимости

$$\beta'_{ce} = 0,95\alpha'_{zop}, \quad (4.26)$$

где  $\alpha'_{zop}$  – коэффициент избытка воздуха в горелках первой зоны, который определяется по формуле:

$$\alpha'_{zop} = \frac{\alpha_m - 0,5\Delta\alpha_m - \beta_H}{\overline{B_1}}, \quad (4.27)$$

где  $\beta_H$  – доля воздуха, поступающего во вторую (верхнюю) зону горения топлива, в задаче для всех видов топлива  $\beta_H = 0,21$ ;

$\overline{B_1}$  – доля топлива, поступающего в первую зону горения, задана (табл.4.2).

При этом адиабатическая температура горения  $T'_a$  определяется по формуле (4.4) для полного коэффициента избытка воздуха  $\alpha_{zop}$ .

Расчет концентрации остаточного кислорода в зоне реакции  $C_{O_2}$  осуществляется по формуле (4.24) с заменой в ней  $\alpha_{zop}$  на  $\alpha'_{zop}$ . В случае, если разность  $(\alpha'_{zop} - 1)$  меньше 0,02 или становится отрицательной величиной, то она принимается равной 0,02.

В остальном методика расчета аналогична варианту одноступенчатой технологии сжигания топлива в котле.

## СОДЕРЖАНИЕ

Вступление.....	3
1. Общие методические указания.....	4
Литература.....	5
2. Программа и методические указания к темам дисциплины.....	6
2.1. Введение.....	6
2.2. Раздел 1. Технологические и химические методы снижения выбросов оксидов азота.....	7
2.2.1. Образование оксидов азота при сжигании энергетических топлив на ТЭС.....	7
2.2.2. Технологические и режимные (топочные) методы снижения концентраций оксидов азота ( $C_{NO_x}$ ).....	8
2.3. Очистка продуктов сгорания топлива от оксидов азота.....	11
2.3.1. Метод селективного некаталитического восстановления $NO_x$ (СНКВ).....	12
2.3.2. Метод селективного каталитического восстановления $NO_x$ (СКВ).....	13
2.3.3. Методы неселективного каталитического восстановления $NO_x$ (НСКВ) и разложения $NO_x$ гетерогенными восстановителями.....	14
3. Раздел 2. Снижение выбросов окислов серы в атмосферу.....	16
3.1. Проблемы и задачи, возникающие при защите окружающей среды от выбросов сернистых соединений. Методы сероочистки топлив до их использования в котлах.....	16
3.2. Сероочистка дымовых газов.....	19
3.2.1. Мокрые методы сероочистки.....	20
3.2.2. Мокро-сухие и сухие методы сероочистки.....	21
3.2.3. Каталитические методы сероочистки дымовых газов.....	21
3.2.4. Методы, позволяющие одновременно снижать выбросы оксидов азота и диоксидов серы.....	23
4. Контрольная работа.....	24
4.1. Теоретическая часть.....	24
4.1.1. Методические указания к теоретической части контрольной работы.....	27
4.2. Практическая часть(задача).....	27
4.2.1. Методические указания к практической части контрольной работы.....	28

Навчальне видання

Програма, методичні вказівки та контрольні завдання з курсу «Захист навколишнього середовища в теплоенергетиці» для студентів спеціальності 7.090505 «Котли та реактори» усіх форм навчання

Російською мовою

Укладачі: ГОНЧАРЕНКО Леонід Васильович  
ТЮТЮНИК Лариса Іванівна

Відповідальний за випуск О.В.Єфімов  
Роботу до друку рекомендував Г.А.Крутиков

В авторській редакції

План 2005 р., поз. 93/

Підп. до друку XX.XX.05. Формат 60х84 1/16. Папір офсет. №2.  
Друк – ризографія. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 2,5.  
Обл. – вид. арк. 2,8. Наклад 50 прим. Зам. № . Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ» 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Свідectво про державну реєстрацію ДК № 116 від 10.07.2000 р.

---

Друкарня НТУ «ХПІ». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.